

## МЕТОД ЛОКАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЛН ЛЭМБА, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ЛАЗЕРНЫМИ НАНОИМПУЛЬСАМИ

*Проведено экспериментальное исследование зависимости основных параметров у. з. импульсов волн Лэмба, возбуждаемых оптико-термическим излучателем круглой формы, от его диаметра. Обнаружено, что начиная с диаметра 3,0 мм, происходит разделение у. з. импульса на два. Считается, что источниками разделенных импульсов являются диаметрально противоположные края ОТ-излучателя. Из результатов эксперимента следует, что зависимость времени распространения максимумов разделенных импульсов от диаметра ОТ-излучателя является линейной. Исходя из этого, предложен графический метод локального измерения групповой средней скорости волн Лэмба.*

**Ключевые слова:** ультразвуковые волны Лэмба, оптико-термический излучатель, лазерное возбуждение, широкополосный ЭМА-приемник.

Известны методы оценки физико-механических свойств металлоизделий, основанные на измерении скоростей ультразвуковых (у. з.) волн различных видов [1; 2]. При этом ввод и прием ультразвука в изделие осуществляется, как правило, пьезопреобразователями через контактные среды. В данной работе рассматривается метод измерения групповой скорости ультразвуковых волн Лэмба в листовых металлоизделиях, генерируемых и регистрируемых бесконтактным способом с помощью лазерных наноимпульсов и широкополосного (ш. п.) ЭМА-приемника [3].

Для проведения измерений использовалась установка, схема которой показана на рис. 1. Она состоит из импульсного лазера 1, диафрагмы 2, исследуемых образцов 3, ЭМА-приемника волн Лэмба 4, усилителя тока 5, усилителя напряжения 6, цифрового осциллографа 7.

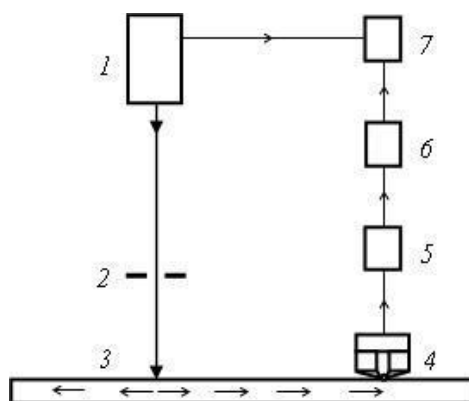


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – диафрагма; 3 – металлическая пластина; 4 – ЭМА-приемник; 5 – усилитель тока; 6 – усилитель напряжения; 7 – цифровой осциллограф

Генерация волн Лэмба осуществляется импульсным лазером Nd: YAG «Brilliant B» фирмы QUANTEL с модулируемой добротностью. Длина волны лазерного излучения 1064 нм, длительность и энергия световых импульсов равны соответственно 4–6 нс и 0,85 Дж. Диаметр светового пучка 9,5 мм. Образцами служили металлические пластины размерами 270х60 мм и толщиной от 0,6 до 2,5 мм.

При лазерном облучении металлических пластин металл в зоне действия наносекундных световых импульсов нагревается и становится источником у. з. волн. Эффективность такого оптико-термического источника (в дальнейшем ОТ-излучатель) определяется мощностью лазерного излучения и теплофизическими свойствами металла, а также зависит от его формы и размеров. Возбуждаемые ОТ-излучателем у. з. импульсы обладают достаточно широким спектром излучаемых частот и распространяются в пластине с различными скоростями.

Регистрируются у. з. волны Лэмба ш. п. ЭМА-приемником, который практически без искажений преобразует акустические импульсы в электромагнитные. После усиления электромагнитные импульсы поступают на вход ш. п. цифрового осциллографа.

Предлагаемый в настоящей статье метод измерения скорости у. з. волн Лэмба, возбуждаемых лазерными наноимпульсами, является следствием

результатов экспериментальных исследований зависимости основных характеристик у. з. импульсов от размеров ОТ-излучателя.

Эксперимент проводился следующим образом. Лазерное излучение максимальной мощности направляется на образец через диафрагму с круглым отверстием. В результате на поверхности пластины начинает действовать ОТ-излучатель у. з. волн в форме правильного круга. В ходе эксперимента диаметр отверстия диафрагмы, а значит и диаметр ОТ-излучателя, изменялся от 1,0 до 9,0 мм с шагом 0,5 мм. Форма и результаты измерения амплитудно-временных параметров у. з. импульсов, преобразованных ЭМА-приемником, выводились на дисплей осциллографа.

Из анализа полученных осциллограмм следует, что для ОТ-излучателей диаметр которых не превышает 3,0 мм, форма, максимальная амплитуда, длительность и частота колебаний, заполняющих у. з. импульс, существенно не изменяются. Количественно эти параметры (кроме амплитуды) можно оценить из приведенной на рис. 2 (а) осциллограммы у. з. импульса, возбуждаемого ОТ-излучателем диаметром 1,0 мм в пластине толщиной 0,6 мм.

По мере увеличения диаметра ОТ-излучателя форма у. з. импульса и его параметры изменяются. Так на рис. 2 (б) приведена осциллограмма у. з. импульса, возбуждаемого ОТ-излучателем диаметром 9,0 мм. Видно, что произошло его разделение на два импульса, каждый из которых имеет свою максимальную амплитуду, длительность и частоту колебаний.

Такое разделение импульса можно объяснить тем, что при лазерной генерации ультразвука его интенсивность определяется в основном градиентом температуры. А поскольку у ОТ-излучателя градиент температуры максимален на его границах, то они и вносят основной вклад в возбуждаемое акустическое поле. Если рассматривать диаметрально противоположные границы ОТ-излучателя, то возбуждаемые ими у. з. импульсы проходят до ЭМА-приемника разные расстояния. Максимум импульса от дальней границы регистрируется позднее, чем максимум импульса от ближней. «Время запаздывания»

определяется расстоянием между границами ОТ-излучателя, то есть его диаметром, и скоростью распространения ультразвука. По результатам проведенного эксперимента была найдена зависимость «времени запаздывания» у. з. импульсов волн Лэмба от диаметра ОТ-излучателя. На рис. 3 построен график этой зависимости.

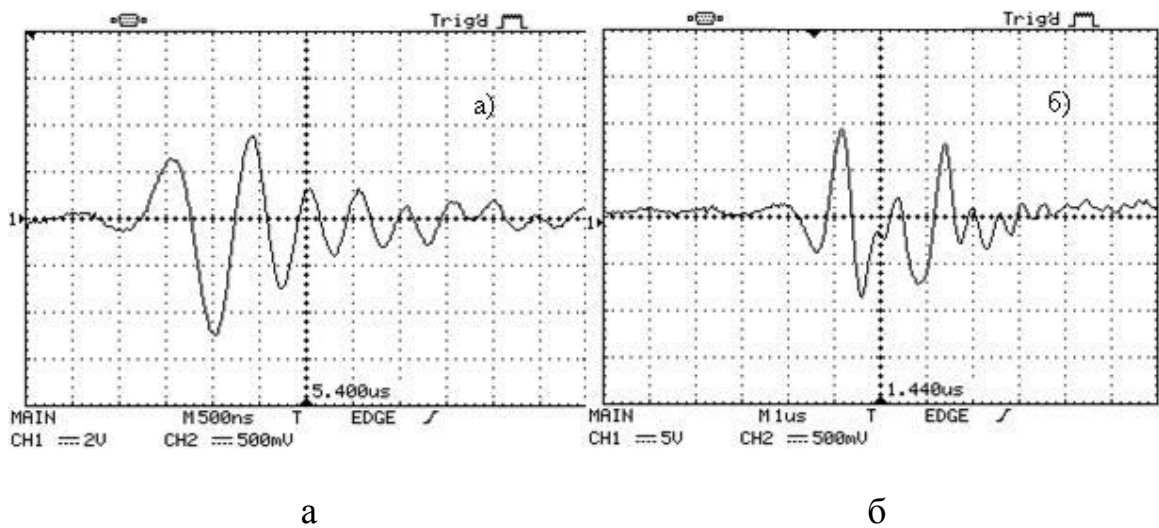


Рис. 2. Импульсы у. з. волн Лэмба от «оптико-термического» излучателя:  
а – диаметром 1,0 мм, б – диаметром 9,0 мм

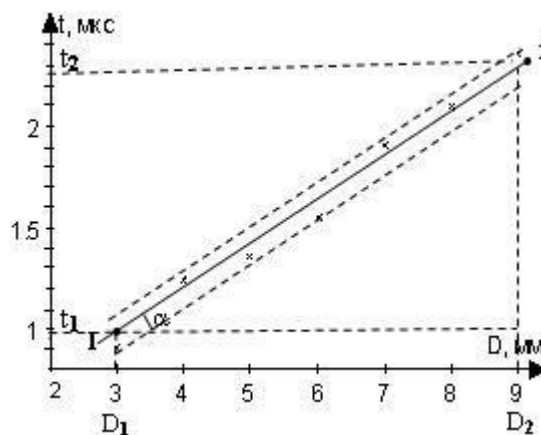


Рис. 3. Зависимость «времени запаздывания» импульсов волн Лэмба, излучаемых диаметрально противоположными границами ОТ-излучателя, от его диаметра

Видно, что она является линейной, и тогда по коэффициенту  $k$  экспериментальной прямой нетрудно найти среднее значение скорости  $\langle v \rangle$  распространения у. з. волн Лэмба.

Проведем расчет скорости. По графику, приведенному на рис. 3, находим угловой коэффициент

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{t_2 - t_1}{D_2 - D_1}.$$

Тогда

$$\langle v \rangle = \frac{1}{k} = \frac{9 - 3}{2.36 - 0.95} = 4.26 (\text{мм} / \text{мкс}).$$

Оценим погрешность измерения. Доверительные границы относительной  $E_v$  и абсолютной  $\Delta_v$  суммарной погрешностей при многократных косвенных измерениях скорости оцениваются стандартным методом [4]. При этом систематическая погрешность  $\gamma$  определяется в основном максимальной погрешностью измерительных приборов (осциллограф и микрометр), а случайная погрешность  $\varepsilon$  оценивается графическим методом с доверительной вероятностью  $p = 0,95$ . В результате расчета получаем:

$$v = (4,26 \pm 0,26) \text{мм} / \text{мкс}, E_v = 6,0\% \text{ при } p = 0,95.$$

Таким образом, разделение импульсов у. з. волн Лэмба, генерируемых ОТ-излучателем, вследствие увеличения его диаметра, можно использовать для измерения их средней скорости. При этом длина участка изделия, на котором производится измерение, не превышает диаметра ОТ-излучателя (диаметра лазерного пучка).

Следует заметить, что предложенная методика может быть успешно применена и для измерения скорости поверхностных ультразвуковых волн.

### **Вывод**

Предложен графический метод измерения средней скорости у. з. волн Лэмба, возбуждаемых наносекундными лазерными импульсами. При этом длина участка изделия, на котором производится измерение, не превышает диаметра

оптико-термического излучателя (лазерного пучка). Проведен расчет средней скорости волн Лэмба для металлической пластины толщиной 0,6 мм. Предел допускаемой суммарной относительной погрешности при измерении скорости не превышает 6 %.

### **Литература**

1. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение. 1981. 230 с.
2. Методы акустического контроля металлов / под ред. Н. П. Алешина. М.: Машиностроение, 1989. 210 с.
3. ЭМА-регистрация ультразвуковых волн Лэмба, возбуждаемых лазерными наноимпульсами / Гуревич С. Ю., Петров Ю. В., Голубев Е. В., Шульгинов А. А. // Дефектоскопия. 2013. № 8. С. 4–8.
4. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин / Л.: Наука, 1986. 108 с.